

Multi-Objective Optimization of Inductive Power Transfer Systems for EV Charging

Doctoral Thesis**Author(s):**

Bosshard, Roman

Publication date:

2015

Permanent link:

<https://doi.org/10.3929/ethz-a-010664107>

Rights / license:

In Copyright - Non-Commercial Use Permitted

Diss. ETH No. 23176

Multi-Objective Optimization of Inductive Power Transfer Systems for EV Charging

A thesis submitted to attain the degree of

DOCTOR OF SCIENCES of ETH ZURICH
(Dr. sc. ETH Zurich)

presented by

ROMAN BOSSHARD

MSc ETH

born on 20.12.1986

citizen of Oetwil am See, Switzerland

accepted on the recommendation of

Prof. Dr. Johann W. Kolar, examiner

Prof. Dr. William G. Hurley, co-examiner

2015

Abstract

ELECTRIC mobility is rapidly gaining popularity owing to the increasing CO₂-awareness and the lower total cost of ownership of Electric Vehicles (EV). Rising market shares of EV among newly sold vehicles document the trend towards more sustainable ways of transportation. Nevertheless, further improvement is still required to remove technological barriers that currently hinder a widespread adoption. On one hand, the development of electrical energy storage systems with ever higher energy and power densities addresses the limited electrical driving range and long battery charging time of today's EV. On the other hand, innovative charging concepts increase the acceptance of the technology among consumers and accelerate the transition from traditional to electric mobility.

Unique advantages result from the contactless transmission of the battery charging energy by Inductive Power Transfer (IPT) across the air gap between a charging platform embedded in the road surface and a receiver coil on the EV. The elimination of the galvanic connection between the charging station and the vehicle simplifies the charging process and removes safety concerns related to the handling of the electrical equipment. In addition, an automatically established power transfer without the need for moving mechanical components is particularly attractive for the charging of public transportation EV. It enables the integration of the charging process with the regular vehicle operation by *opportunity charging* at bus stations, taxicab stands, or traffic lights along the route. Owing to the reduced dwell times for recharging at the depot, operators can lower the number of fleet vehicles and the related operating costs. Furthermore, the more frequent recharging reduces the depth of discharge of the battery. This extends the battery lifetime and allows dimensioning the EV with a smaller on-board energy storage capacity and consequently with lower initial costs.

The fundamental working principles of contactless charging systems and the key challenges in their optimization are derived from the analysis of a conventional conductive EV charger in the first part of this thesis. It is shown that the design of contactless EV battery charging systems is characterized by multiple competing optimization objectives. The limited construction volume on the vehicle demands for a high power density of the on-board power electronics equipment, particularly of the transmission coils. Moreover, a high efficiency is required for the charging process to minimize energy costs and to simplify the thermal

management of the components. Low electromagnetic stray fields and a high coil positioning tolerance are required in addition. The analysis of the physical limitations and the interdependencies between these performance factors is the main topic of the thesis. A multi-objective optimization process is proposed for taking into account multiple design objectives simultaneously. A combination of analytical models with electromagnetic finite element method calculations is employed for the calculation of the power losses, the stray field, and the necessary construction volume of the IPT coils. Based on the mathematical models, the physical performance limits are calculated. The results show that trade-offs are encountered between the efficiency of the power transfer, the power density of the transmission coils, and the magnetic stray field, which are described by Pareto fronts at the physical performance limit.

In a first step, the proposed multi-objective IPT optimization process is theoretically and experimentally validated by the design of a scaled prototype. A DC-to-DC efficiency of 96.5% is achieved for the transmission of 5 kW across an air gap of 52 mm with 210 mm diameter coils. In a second step, the approach is applied to the optimization of a contactless EV charger with 50 kW charging power. The realized transmission coils have a volumetric power density of 2.7 kW/dm^3 and a gravimetric power density of 2.0 kW/kg . Thereafter, the design of the power electronic converter is discussed. An all-SiC MOSFET solution comprising multiple parallel-interleaved converter modules with coupled magnetic components is optimized for high compactness and high efficiency. The power density of the presented $50 \text{ kW}/800 \text{ V}/85 \text{ kHz}$ hardware prototype is 9.5 kW/dm^3 at a calculated DC-to-AC efficiency of 98.62%. The thesis ends with a comprehensive experimental investigation of the full-scale 50 kW IPT system and the verification of the presented calculation models. The DC-to-DC efficiency is measured as 95.8%, including the IPT resonant system as well as all power electronic conversion stages. In addition, measurements of the magnetic stray field document that the presented 50 kW prototype system fulfills the ICNIRP 2010 guidelines at 800 mm lateral distance from the coil center.

The thesis is concluded by a critical assessment of the physical limits and the technical feasibility of contactless EV charging systems. Thereupon, recommendations are given for future research areas that could help overcoming today's limitations of the technology.

DIE ELEKTROMOBILITÄT gewinnt auf Grund des erhöhten CO₂-Bewusstseins und der geringeren Gesamtbetriebskosten von Elektrofahrzeugen (Electric Vehicles, EV) zunehmend an Popularität. Der ansteigende Marktanteil von Elektrofahrzeugen an den Neuzulassungen belegt den Trend in Richtung nachhaltiger Transportmittel. Es besteht jedoch weiterhin Verbesserungspotential zur Überwindung technologischer Hürden, welche momentan eine umfassende Verbreitung behindern. Einerseits ermöglicht die Entwicklung elektrischer Energiespeicher mit immer höherer Energie- und Leistungsdichte eine Erweiterung der elektrischen Reichweite und eine Verkürzung der Batterieladedauer heutiger Fahrzeuge. Andererseits können innovative Ladekonzepte die Akzeptanz der Technologie bei den Konsumenten fördern und dadurch den Übergang von der traditionellen zur elektrischen Mobilität beschleunigen.

Einzigartige Vorteile ergeben sich aus der berührungslosen Übertragung der Batterieladeenergie mittels induktiver Leistungsübertragung (Inductive Power Transfer, IPT) durch den Luftspalt zwischen einer in die Strassenoberfläche eingebetteten Ladeplattform und einer fahrzeugseitigen Empfängerspule. Die Entfernung der galvanischen Verbindung zwischen der Ladestation und dem Fahrzeug vereinfacht den Ladeprozess und beseitigt Sicherheitsbedenken im Zusammenhang mit der Handhabung der elektrischen Teile des Ladegeräts. Ein automatischer Leistungstransfer zum Fahrzeug ohne bewegliche mechanische Teile ist ausserdem insbesondere attraktiv für das Laden von Elektrofahrzeugen des öffentlichen Verkehrs. Die Technologie eröffnet die Möglichkeit einer Integration des Ladeprozesses in den regulären Betrieb mittels *Gelegenheitsladung* an Bushaltestellen, Taxiständen oder an Verkehrsampeln entlang der Fahrzeugroute. Auf Grund der reduzierten Stehzeit für das Batterieladen im Depot, kann der Betreiber die Anzahl der Flottenfahrzeuge und die damit verbundenen Betriebskosten reduzieren. Zudem kann durch die regelmässige Aufladung die Entladetiefe der Batterien reduziert werden. Dies ermöglicht eine Erhöhung der Batteriebensdauer sowie eine Auslegung der Elektrofahrzeuge mit einem kleineren Energiespeicher, was eine Senkung der Investitionskosten zur Folge hat.

Im ersten Teil dieser Dissertation werden die grundsätzliche Funktionsweise eines berührungslosen Ladesystems und die Hauptherausforderungen in dessen Auslegung von der Analyse eines konventionel-

len, kabelgebundenen Ladegeräts abgeleitet. Es wird aufgezeigt, dass die Dimensionierung eines berührungslosen Ladesystems durch mehrere konkurrierende Optimierungsziele erschwert wird. Der beschränkte verfügbare Bauraum im Fahrzeug verlangt nach einer hohen Leistungsdichte der fahrzeugseitigen leistungselektronischen Komponenten, insbesondere der Empfängerspule. Ausserdem wird zur Minimierung der Energiekosten und zur Vereinfachung der thermischen Auslegung der Komponenten eine hohe Effizienz benötigt. Weiter sind möglichst geringe elektromagnetische Streufelder und eine hohe Toleranz bezüglich der Spulenpositionierung erforderlich. Die Analyse der physikalischen Grenzen und der Verknüpfungen zwischen den genannten Kenngrössen bildet das Kernthema der Dissertation. Ein Mehrkriterienoptimierungsverfahren wird vorgestellt, welches die simultane Betrachtung mehrerer Dimensionierungsziele ermöglicht. Eine Kombination von analytischen Modellen und elektromagnetischen Berechnungen mit Hilfe der Finite-Elemente-Methode wird für die Abschätzung der auftretenden Verluste, des Streufelds und des benötigten Bauraums der Ladespulen eingesetzt. Basierend auf den mathematischen Modellen werden die physikalischen Grenzen bestimmt. Die Berechnungsergebnisse zeigen Zielkonflikte zwischen der Übertragungseffizienz, der Leistungsdichte der Ladespulen und dem magnetischen Streufeld auf, welche an der physikalischen Grenze durch Pareto-Fronten beschrieben werden.

In einem ersten Schritt wird das vorgeschlagene Mehrkriterienoptimierungsverfahren anhand der Entwicklung eines skalierten Prototypen theoretisch und experimentell verifiziert. Dabei wird für die Übertragung von 5 kW über einen Luftspalt von 52 mm mittels Spulen von 210 mm Durchmesser eine DC-bis-DC Effizienz von 96.5% erreicht. In einem zweiten Schritt wird das Verfahren für die Optimierung eines berührungslosen Ladegeräts für Elektrofahrzeuge mit einer Ladeleistung von 50 kW angewendet. Die realisierten Übertragerspulen weisen eine volumetrische Leistungsdichte von 2.7 kW/dm^3 und eine gravimetrische Leistungsdichte von 2.0 kW/kg auf. Anschliessend wird die Optimierung des leistungselektronischen Konverters besprochen. Eine Lösung mit ausschliesslich Silizium-Karbid Leistungshalbleitern, bestehend aus mehreren, parallel geschalteten Konvertermodulen mit zeitversetzter Taktung und gekoppelten magnetischen Komponenten, wird auf eine hohe Kompaktheit und eine hohe Effizienz ausgelegt. Die Leistungsdichte des vorgestellten $50 \text{ kW}/800 \text{ V}/85 \text{ kHz}$ Hardwareprototypen beträgt 9.5 kW/dm^3 bei einer berechneten DC-bis-AC Effizienz von 98.62%. Die

Dissertation wird abgeschlossen durch eine umfassende experimentelle Untersuchung des 50 kW Ladesystems und die Verifikation der vorgestellten Berechnungsmodelle. Die gemessene DC-bis-DC Effizienz beträgt 95.8%, einschliesslich der berührungslosen Übertragung und aller leistungselektronischen Wandlerstufen. Ausserdem belegt die Messung des magnetischen Streufelds des 50 kW Prototypen die Erfüllung der ICNIRP 2010 Richtlinien in einem lateralen Abstand von 800 mm vom Spulenmittelpunkt.

Die Dissertation wird abgerundet durch eine kritische Untersuchung der physikalischen Grenzen und der technischen Machbarkeit von berührungslosen Ladesystemen für Elektrofahrzeuge. Darauf basierend werden Themengebiete für weitergehende Forschungsarbeiten vorgeschlagen, welche einen Betrag zur Überwindung der heute bestehenden Grenzen der Technologie leisten können.